

УДК 621.455.32

М.Ю. ТИТОВ, А.В. ЛОЯН, Т.А. МАКСИМЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЯ С АНОДНЫМ СЛОЕМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ С УЧЕТОМ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ

В работе представлены результаты численного расчета магнитной системы двигателя с анодным слоем мощностью до 100 Вт с учетом тепловыделений при его работе. Дано описание численной модели для расчета теплового состояния двигателя и приведены результаты расчета. На базе полученных профилей распределения температур в зависимости от количества подводимой тепловой мощности проведен расчет магнитной системы двигателя. Определен диапазон мощностей, при котором не происходит существенного размагничивания элементов магнитной системы и нарушения профиля магнитного поля в канале двигателя. Численные расчеты проводились в программном пакете ANSYS.

Ключевые слова: двигатель с анодным слоем, тепловое состояние, магнитная система, размагничивание.

Введение

В данное время большое количество научно-исследовательских центров занимаются исследованием и разработкой Холловских двигателей (ХД) мощностью до 100 Вт, как наиболее перспективным кандидатом для использования в качестве двигательной установки на микроспутниках [1]. В Харьковском авиационном институте разработан один из типов ХД – стационарный плазменный двигатель СПД-20 показывающий достаточно высокие удельные характеристики [2]. В 2010 г. была начата разработка другого типа ХД – двигателя с анодным слоем (ДАС) с потребляемой мощностью до 100 Вт. Интерес к ДАС обусловлен рядом параметров, согласно которым ДАС может быть более эффективным, чем СПД [3].

Критическим аспектом, определяющим характеристики ХД, является магнитная система (МС). В работе [4] были проведены исследования магнитной системы, направленные на получение требуемого магнитного поля в канале двигателя. Поскольку в результате работы двигатель подвержен воздействию тепловых нагрузок, то остается открытым вопрос о влиянии нагрева двигателя на распределение магнитного поля.

1. Постановка задачи и цели

Целью данной работы является расчет и анализ работы магнитной системы ДАС при тепловых нагрузках. Поскольку известно, что магнитные свойства ферромагнетиков зависят от температуры, то первоначально необходимо провести расчет теплового состояния двигателя и получить картину рас-

пределения температур по его конструкции, а затем решать магнитную задачу. Немаловажным является проверка адекватности данных, полученных в результате решения тепловой задачи.

2. Расчет теплового состояния двигателя

2.1. Численная модель

Для расчета теплового состояния двигателя была разработана конечно-элементная модель (КЭМ) повторяющая геометрию лабораторной модели ДАС.

Поскольку конструкция двигателя является осесимметричной, то для экономии машинного времени на расчет было принято решение использовать двухмерную модель.

На рис. 1 представлен общий вид КЭМ ДАС.

Модель включает в себя все керамические и металлические детали двигателя. На границе расчетной области расположена «стенка», ограничивающая расчетную область.

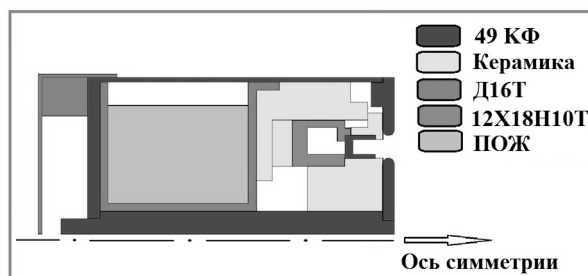


Рис. 1. Общий вид модели для расчета теплового состояния двигателя

В идеальном случае контакт между деталями двигателя происходит по всей поверхности. Поэто-

му для приближения к более реальным условиям между контактируемыми поверхностями были введены граничные области, теплопроводность которых определялась по следующей формуле:

$$\lambda = \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \cdot k_s, \quad (1)$$

где λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности двух контактирующих деталей;

$k_s = 0,05$ – коэффициент определяющий, что контакт поверхностей происходит только по 5 % всей площади [5].

Ширина граничных областей в данном случае равно сумме шероховатостей контактирующих поверхностей.

Свойства материалов описываются через теплопроводность и коэффициент черноты поверхности (табл. 1) [6]. Принято, что свойства материалов постоянны во всем диапазоне температур.

Таблица 1

Свойства материалов

Свойство Материал	Коэффициент теплопроводности Вт/(м·град)	Степень черноты
49КФ	28	0,5
Ст. 10880	69	0,4
Д16Г	130	-
12Х18Н10Т	20	0,3
АБН	10	0,8
Al ₂ O ₃	130	0,8

Модель была разбита плоскими осесимметричными четырехузловыми конечными элементами. Дискрета разбиения определялась пробными численными экспериментами (рис. 2). Уменьшение КЭ ниже 0,05 мм не приводит к увеличению точности расчета.

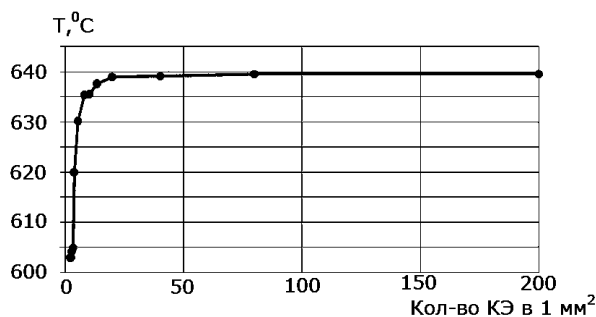


Рис. 2. Зависимость рассчитанной температуры от размера КЭ

За начальные условия для расчёта принята начальная температура всех элементов двигателя 20 °С. Стенка, имеет постоянную температуру 20 °С и коэффициент черноты поверхности 1, что соответствует условиям вакуумной камеры.

Нагрузка осуществляется следующим образом:

1) принимается, что 70 % потребляемой электрической мощности тепловые потери (т.к. современный уровень к.п.д. маломощных ХД составляет 20...40 %).

2) при этом принимается, что мощность тепловыделения в катушке двигателя при токе 3А и напряжении 2 В составляет 3 Вт;

3) суммарные тепловые потоки в РК распределены следующим образом: на поверхности 1 и 2 (рис. 3) задано по 40 % от всей выделяемой тепловой мощности, на группы поверхностей 3 и 4 – по 10 %.

Между различными поверхностями двигателя, а также между наружной поверхностью и условной «стенкой» задан теплообмен излучением. В расчётах конвективный теплообмен не учитывается.

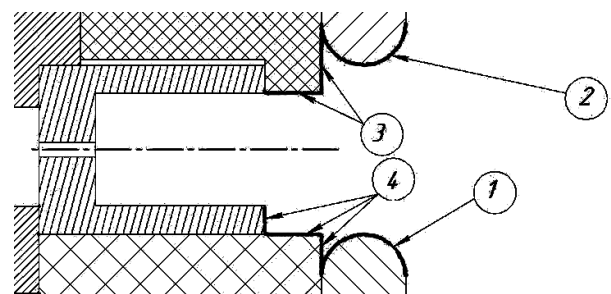


Рис. 3. Схема задания тепловых потоков на стенки разрядной камеры двигателя

2.2. Расчет распределения температур по конструкции двигателя

Расчеты проводились при подведении тепловой мощности в РК двигателя в диапазоне от 50 до 285 Вт. Тепловыделение в катушке принято постоянным – 3 Вт. Пример результата расчета – картина температурного поля представлены на рис. 4.

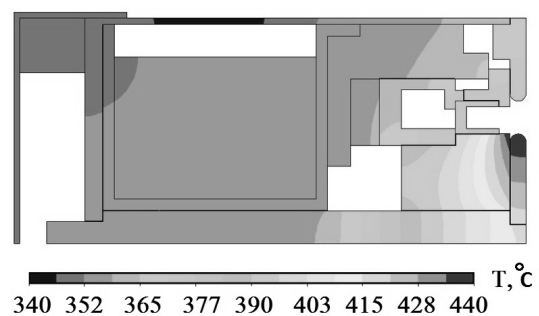


Рис. 4. Распределение температур по конструкции двигателя при 50 Вт тепловой мощности

2.3. Верификация численных результатов

Для верификации данных полученных с помощью численной модели теплового состояния ДАС был проведен натурный эксперимент по получению

информации о тепловом состоянии двигателя при его работе.

Измерение температур проводилось с помощью хромель-копелевых термопар в трех местах двигателя (рис. 5).

На рис. 6 показано изменение температуры во время работы двигателя на режиме $U_D = 115$ В, $N_D = 58$ Вт, $Ma = 0,41$ мг/с, $M_k = 0,8$ мг/с, $I_K = 3$ А.

В табл. 2 приведены данные о тепловом состоянии двигателя полученные в результате численного расчета и натурального эксперимента.

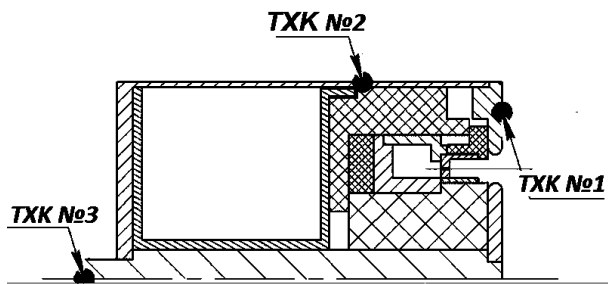


Рис. 5. Схема крепления термопар к двигателю

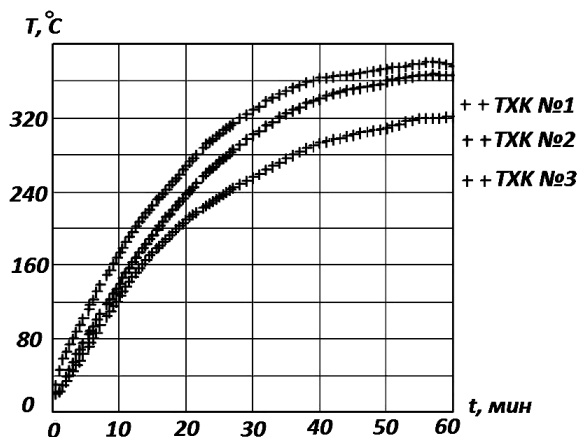


Рис. 6. Изменение температуры в точках крепления термопар

Таблица 2

Сравнение результатов численного моделирования теплового состояния и натурального эксперимента

Режим $U_D = 115$ В, $N_D = 58$ Вт, $Ma = 0,41$ мг/с, $M_k = 0,82$ мг/с, $I_K = 3$ А			
	ТХК №2, °С	ТХК №3, °С	ТХК №1, °С
Эксперимент	365	320	385
Ansys	360	353	370
$\delta, \%$	0,3	10,3	4,1
Режим $U_D = 120$ В, $N_D = 90$ Вт, $Ma = 0,5$ мг/с, $M_k = 0,82$ мг/с, $I_K = 3$ А			
Эксперимент	424	381	459
Ansys	413	408	436
$\delta, \%$	2,6	7,1	5,3

Как видно по табл. 2, расчет температуры с помощью данной численной модели позволяет получить достаточно близкие к экспериментальным данным. Разность между численными и экспериментальными данными составляет не более 11 %.

3. Расчет МС с учетом теплового состояния двигателя

Расчет магнитной системы с учетом теплового состояния двигателя проводился при заранее рассчитанном распределении температуры по элементам в зависимости от подводимой мощности.

Подробное описание численной модели (задание материалов, нагрузки и т.д.) представлено в статье [4]. Однако есть свои особенности.

Геометрическая модель магнитной системы была разбита на зоны, для которых предварительно уже определена температура.

В пределах зоны температура принята постоянной.

Размеры зоны выбирались такими, чтобы разница между максимальным и минимальным значением температуры в пределах одной зоны составляла не более 2 °С.

Значение индукции насыщения при разной температуре определялось согласно зависимости на рисунке 7 [6]. А кривая намагничивания определялась следующей зависимостью:

$$B(H)_{T_i} = \frac{B_{\text{sat}}_{T_i}}{B_{\text{sat}}_{T=20^\circ\text{C}}} \cdot B(H)_{T=20^\circ\text{C}}, \quad (2)$$

где $B_{\text{sat}}_{T_i}$ – индукция насыщения для данной температуры;

$B_{\text{sat}}_{T=20^\circ\text{C}}$ – индукция насыщения при $T=20^\circ\text{C}$;

$B(H)_{T=20^\circ\text{C}}$ – кривая намагничивания при $T=20^\circ\text{C}$ (рис. 8).

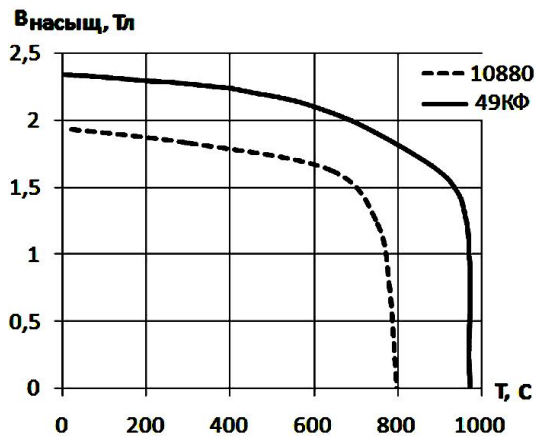


Рис. 7. Зависимость индукции насыщения материалов ст. 10880 и 49КФ от температуры

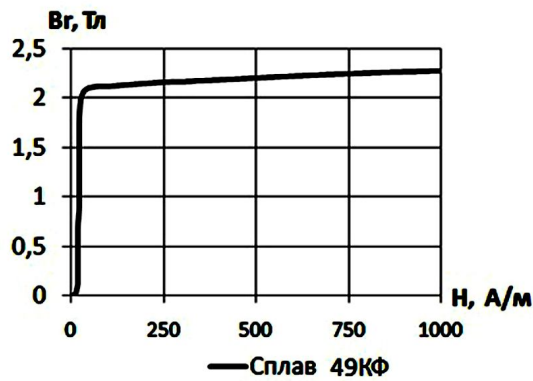


Рис. 8. Кривая намагничивания для сплава 49КФ

Зависимость радиальной составляющей магнитной индукции B_r вдоль средней линии канала двигателя от количества выделяемой тепловой мощности в двигателе представлена на рис. 9.

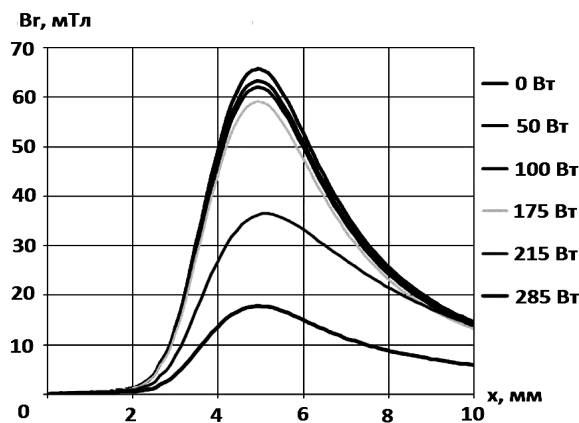


Рис. 9. Зависимость B_r на средней линии РК от количества тепловой мощности

На рис. 10 – 11 представлены картины распределения и силовых линий магнитного поля по элементам двигателя в двух крайних случаях – при отсутствии тепловыделений в двигателе (в предстартовом состоянии) и при тепловой мощности 285 Вт.

По полученным данным видно, что магнитная система при тепловой мощности до 200 Вт работает эффективно – уменьшение B_r не более чем на 15 %, изменений в профиле МП в РК не замечено. При больших тепловых мощностях (более 200 Вт) температура внутреннего полюсного наконечника превышает точку Кюри – как результат падение B_r более чем на 85% и нарушение профиля магнитного поля в РК двигателя.

Поскольку лабораторная модель ДАС рассчитана на электрическую мощность не более 100 Вт и при условии, что мощность тепловыделений в конструкции составляет 70 Вт, уменьшение B_r будет не более 5%.

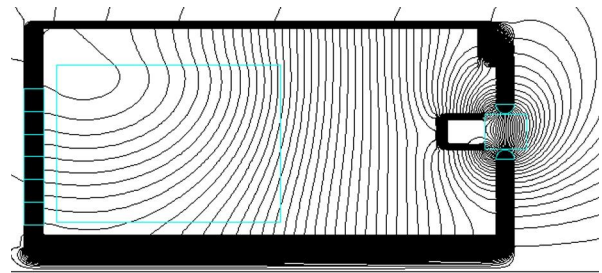


Рис. 10. Профиль силовых линии МП по двигателю в предстартовом состоянии

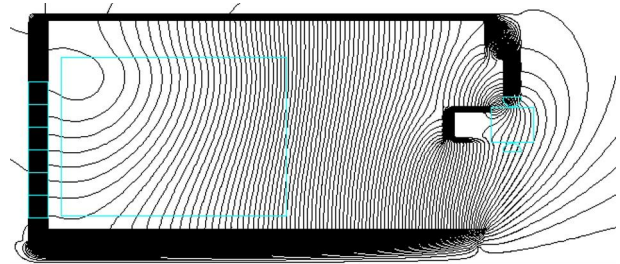


Рис. 11. Профиль силовых линии МП при 285 Вт тепловой мощности

Выводы и перспективы дальнейших работ

Разработана численная модель и проведены расчеты распределения температурного поля по конструкции двигателя в зависимости от количества выделяемой тепловой мощности. Проведена верификация численных данных. Разность расчетных и экспериментальных данных не превысила 11 %.

По полученному распределению температур была рассчитана МС с учетом теплового состояния двигателя. При тепловыделениях до 200 Вт уменьшение B_r в разрядном канале двигателя составляет не более 15% и может быть компенсировано увеличением тока через катушку. При этом заметного изменения конфигурации магнитного поля замечено не было. При тепловыделениях > 200 Вт происходит резкое снижение B_r в канале двигателя и искажение профиля силовых линий.

В дальнейшем необходимо провести исследование влияния теплового состояния двигателя на изменение конфигурации магнитного поля двигателя, и, как следствие, на его рабочие характеристики: тягу, фокусировку струи, к.п.д.

Литература

1. Максименко Т.А. Холловский двигатель малой мощности для систем коррекции орбиты малых мины и микроспутников / Т.А. Максименко, А.В. Лоян, Н.Н. Кошелев // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 9(25). – С. 140–144.

2. Loyan A.V. Performance investigation of SPT-20M Low Power Hall Thruster / A.V. Loyan, T.A. Maksymenko // 30th Int. Electric Propulsion Conference. – Florence, Italy, 16–20 Sept. 2007. – IEPC 2007–100.

3. Zakharenkov L. Study of Low Power TAL Characteristics / L. Zakharenkov, G. Chislov, A. Semekin // 27-th International Electric Propulsion Conference. – Pasadena, USA, 2001. – IEPC-01-041.

4. Титов М.Ю. Численное моделирование магнитной системы Холловского двигателя мощно-

стью до 100 Вт. / М.Ю. Титов, А.В. Лоян, В.А. Подгорный, В.А. Федотенко // Вестник двигателестроения. – 2010. – № 2. – С. 73-78.

5. Мухачев Г.А. Термодинамика и теплопередача: учеб. для авиац. вузов. / Г.А. Мухачев, В.К. Шукин. – М.: Высш. шк., 1991. – 480 с.

6. Преображенский А.А. Магнитные материалы / А.А. Преображенский. – М.: Выс. шк., 1965. – 234 с.

Поступила в редакцию 12.05.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. кафедры № 402 А. И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского, «ХАИ», Харьков, Украина.

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ДВИГУНА З АНОДНИМ ШАРОМ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ З УРАХУВАННЯМ ТЕПЛООВОГО СТАНУ

М.Ю. Тітов, А.В. Лоян, Т.О. Максименко

У роботі представлені результати чисельного розрахунку магнітної системи двигуна з анодним шаром потужністю до 100 Вт з урахуванням тепловиділень при його роботі. Дано опис чисельної моделі для розрахунку теплового стану двигуна і приведені результати розрахунку. На базі отриманих профілів розподілу температур залежно від кількості підводимої теплової потужності проведено розрахунок магнітної системи двигуна. Визначено діапазон потужностей, при якому не відбувається істотного розмагнічування елементів магнітної системи і порушення профілю магнітного поля в каналі двигуна. Чисельні розрахунки проводилися в програмному пакеті ANSYS.

Ключові слова: двигун з анодним шаром, тепловий стан, магнітна система, розмагнічування.

COMPUTATION OF MAGNETIC SYSTEM OF LOW-POWER ANODE LAYER THRUSTER TAKING INTO ACCOUNT THERMAL CONDITIONS

M. Yu. Titov, A. V. Loyan, T. A. Maksymenko

There are results of the magnet system numerical computation of the Anode Layer Thruster with power up to 100 watts, taking into account heat generation while its work. The description of the numerical model for computation of thermal condition of the thruster is given and the results of the computation are shown. On the basis of the obtained profiles of temperature distribution depending on the amount of heat the computation of the magnetic system is made. The range of powers at which there is no significant demagnetization of the magnetic elements of the system and disturbance of the magnetic field profile in the channel of the thruster. Numerical computations were carried out in the software package ANSYS.

Key words: thruster with anode layer, thermal state, the magnetic system, demagnetization.

Титов Максим Юрьевич – инженер кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: m.y.titov@mail.ru.

Лоян Андрей Витальевич – канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: a.loyan@khai.edu.

Максименко Тарас Александрович – научный сотрудник кафедры двигателей и энергоустановок летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: taras@d4.khai.edu.